

**А.И.СКИБЕНКО**, канд. физ.-мат. наук; **Ю.В.ЛАРИН**;  
**А.В.ПРОКОПЕНКО**; **Ю.Н.НЕЗОВИБАТЬКО**; **Ю.В.КОВТУН**;  
**Е.И.СКИБЕНКО**, канд. физ.-мат. наук;  
**В.Б.ЮФЕРОВ**, докт.техн.наукж ННЦ ХФТИ НАНУ

## **СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ НА ТЯЖЕЛЫХ ГАЗАХ И ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ИМПУЛЬСНОМ ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ ДЛЯ СЕПАРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Почато дослідження процесу й особливостей утворення імітаційної плазми на важких газах і парах металів для сепараційних технологій на основі імпульсного відбивного розряду. Проведено експерименти по вивченню умов подачі поділової речовини в область розряду за допомогою механізму розпилення осажденного раніше матеріалу під дією часток і потоків плазми, генеруємих в імпульсному відбивному розряді.

Researches of process and features of production of imitating plasma on heavy gases and metal vapors for separating technologies are started, on the basis of the pulse reflective discharge. On studying conditions of supply of divided substance experiments are lead to area of the discharge by means of the mechanism of dispersion besieged a material before under action of particles and the streams of plasma generated in pulse reflective discharge.

Сепарационные технологии, производящие разделение элементов после их ионизации в силовых скрещенных электрических и магнитных полях, предполагается в первую очередь использовать для переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). В [1-6] описываются различные варианты реализации устройств для разделения вещества на элементы магнито-плазменными методами, в том числе вариант отражательного разряда Пеннинга. В тоже время на этапе разработки, опробования и осуществления отдельных технологических решений и технологий в целом, исследования физических процессов и технологических решений предполагается проводить на имитационных веществах, в частности на смеси тяжелых благородных газов, таких как Ar, Kr, Xe, в различном процентном их содержании и возможно в сочетании с парами металлов. Поэтому представляет интерес исследование процесса ионизации и образования плазмы на имитационных веществах (смесях) с учетом эффективности ионизации в различных ионизационных состояниях в зависимости от энерговклада в разряд и других его параметров, что необходимо для оптимизации параметров плазмообразующей системы (или систем), определения ее эффективности и проведения сравнительного анализа подобных систем различного типа. С учетом вышесказанного в первую очередь представляет интерес исследование динамики роста плотности плазмы  $n_p = f(t)$ , пространственного распре-

деления плотности плазмы, определения скорости ионизации  $s = f(Q)$  и параметрических характеристик разряда, то есть  $n_p, v_{ep}, \omega_{ep} = f(H, p, c)$ . Таким образом, конечной целью запланированных и проводимых экспериментов являются исследования возможности получения сепараторной плазмы требуемых параметров [7] и изучения ее свойств в отражательном разряде в среде тяжелых газов. На данном этапе ограничимся рассмотрением предварительных результатов этих экспериментов с водородной и аргоновой плазмой при использовании в качестве катодов монометалла и композитного материала.

Эксперименты проводились на установке (рис. 1), состоящей из разрядной камеры 1, магнитных катушек 2, вакуумных откачных постов 3, системы напуска рабочего газа 4. В торцах разрядной камеры 1 размещались катоды 5, анодом служили дополнительные цилиндрические электроды 6 и обечайка разрядной камеры 1.

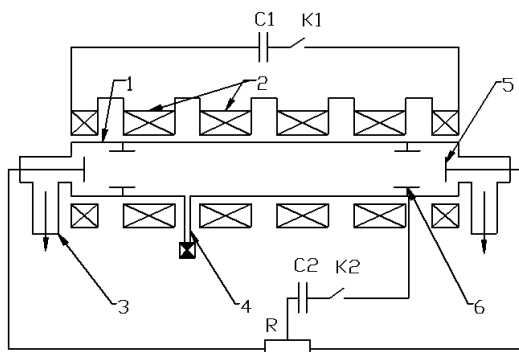


Рисунок 1 – Схематическое изображение экспериментальной установки:  
1 – разрядная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – вакуумные откачные посты;  
4 – система напуска рабочего газа; 5 – катоды; 6 – дополнительные электроды,  
C1, C2 – емкостные накопители, K1, K2 – коммутаторы тока,  
R – балластное сопротивление

Разрядная камера имела следующие размеры: внутренний диаметр 200 мм, длина 1500 мм. Магнитное поле создавалось соленоидом, состоящим из шести катушек, две из них, торцевые, создают магнитные пробки с пробочным отношением 1,25, четыре средние – равномерное по оси магнитное поле с напряженностью до 4,7 кЭ в импульсе. Длительность импульса магнитного поля составляет 18 мс. Начальное давление в камере составляло  $10^{-6}$  тор, затем напускался рабочий газ до давления  $1-8 \cdot 10^{-3}$  тор. Плазма образовывалась в результате разряда конденсаторной батареи C2 емкостью 200 мкФ, напряжением до 4 кВ и длительностью 3,5 мс между холодными катодами 5 диаметром 100 мм и кольцевыми анодами 6 диаметром 160 мм, соединенными с камерой и отстоящими от катодов на расстоянии 100 мм. При этом

реализовывались скрещенные Е и Н поля (продольное Н, поперечное Е). На рис. 2 приведены осциллограммы магнитного поля и разрядного тока. Использовались катоды двух типов: выполненные из монометалла – алюминий и медь; композитного материала – медь с напыленным методом КИБ титаном.

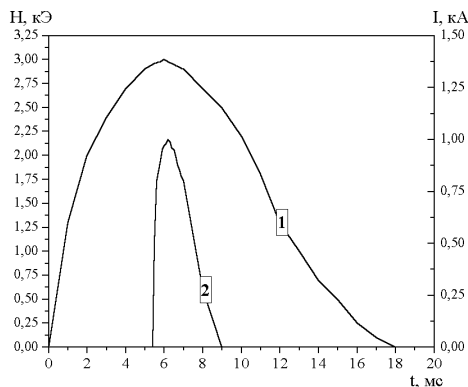


Рисунок 2 – Осциллограммы магнитного поля и разрядного тока:  
1 – магнитное поле; 2 – разрядный ток.

Расположение средств диагностики приведено на рис. 3. К ним следует отнести СВЧ-интерферометр с рабочей длиной волны  $\lambda = 8$  мм, а также рефлектометр–коррелятор с длиной волны  $\lambda = 10,7$  мм. Рупорные антенны 3,4 предназначены для СВЧ интерферометрии плазмы, антенны 5,6 служат для проведения СВЧ рефлектометрических измерений для определения профиля плотности и скорости вращения плазмы посредством определения сдвига взаимнокорреляционной функции двух СВЧ сигналов, отраженных от участков слоя плазмы одной плотности и разнесенных по азимуту [8].

В эксперименте было проведено сравнение динамики роста и спада плотности плазмы во времени для двух типов катодов: из монометалла и композитного материала. Оказалось (см. рис. 4), что при реализации разряда в водороде с системой электродов (катодов) с напыленным титаном на поверхности, обращенной к разряду, прослеживается удлинение стадии существования плазмы с плотностью  $9\text{--}3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Величина удлинения стадии существования плазмы для катодов с титановым напылением составляет  $\sim 6$  мс по сравнению с разрядом в водороде при использовании монометаллических электродов без напыления. При этом, существенным может оказаться поступление в разряд значительного количества примесных атомов титана, а также растворенных в нем газов –  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{C}$ , за счет процессов распыления слоя титана на поверхности катодов частицами и потоками образовавшейся плазмы. В пользу этого говорит

тот факт, что при этом меняется характер и окраска свечения разряда – из фиолетового свечение становится белесым. Этот эффект может оказаться весьма полезным в будущем при создании металлических плазм для сепарационных технологий.

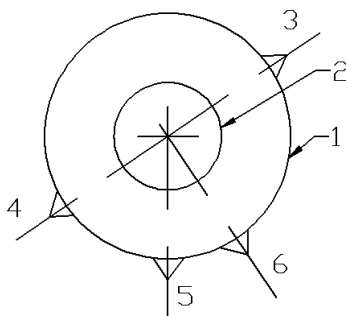


Рисунок 3 – Схема расположения диагностических средств в плоскости поперечного сечения разрядной камеры и плазменного столба:

1 – разрядная камера, 2 – граница плазмы, 3,4 – передающая и приемная антенны СВЧ-интерферометра; 5,6 – антенны СВЧ рефлектометра – коррелятора

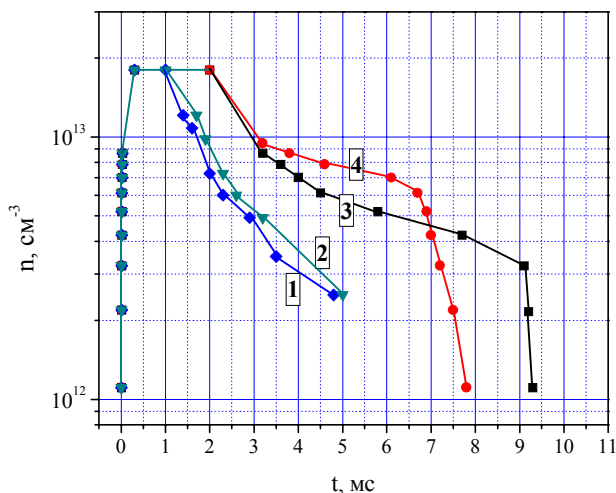


Рисунок 4 – Зависимости плотности плазмы от времени для двух типов катодов:

1,2 – монометалл; 3,4 – монометалл с напыленным слоем Ti.

кривые 2,3 –  $H_{\max} = 4,7$  кЭ; 1,4 –  $H_{\max} = 2,3$  кЭ;  $P = 1,8 \cdot 10^{-3}$  торр

Появления временного удлинения стадии существования плазмы при сравнении динамики распадающейся плазмы для двух типов используемых

катодов может быть объяснено следующим образом. Известно [9], что время удержания  $\tau_{\text{уд.}}$  плазмы в магнитной ловушке пробочной конфигурации может быть определено по формуле Будкера:

$$\tau_{\text{уд.}} = 1,81 \bar{\tau}_i \lambda(R), \quad (1)$$

где  $\bar{\tau}_i$  – среднее ионное время релаксации, которое равно:

$$\bar{\tau}_i = \frac{3\sqrt{3m_i}}{8\pi n L e^4} \cdot T_i^{3/2}, \quad (2)$$

а функция  $\lambda(R)$  может быть аппроксимирована выражением  $\lambda(R) = \lg R$ , где  $R$  – пробочное отношение. Согласно этого переход от разряда на легких атомах, например, водороде, к разряду на более тяжелых атомах, например, титане, при прочих равных условиях может привести к увеличению времени удержания плазмы, что и наблюдается реально в эксперименте (смотри рис. 4). Действительно, при начальном значении плотности плазмы  $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  изменение плотности в  $e$ -раз соответствует моменту времени 1,7 мс после начала разряда в случае использования катодов из монометалла (кривая 2 на рис. 4). В то же время при изменении материала катодов – переход на монометал с напыленным слоем Ti, тот же спад плотности в  $e$ -раз приходится на момент времени 7,3 мс, что говорит об удлинении процесса существования плазмы и изменении динамики распада плазмы заданной плотности, причем временное удлинение процесса увеличивается в 4,3 раза по сравнению с катодом из чистого монометалла без напыления. Если воспользоваться формулой Будкера для оценки времени удержания ионов водорода и ионов титана, то отличие времени удержания этих ионов при прочих равных условиях составят величину равную  $\sqrt{m_{\text{Ti}}^i / m_{\text{H}}^i} \sim 4,7$  раза, что согласуется с результатами эксперимента.

Наблюдаемая картина распада плазмы (рис. 4) также может быть связана с увеличением полного числа частиц плазмы в разряде за счет поступления и ионизации примесных атомов H, O, C.

Кроме того, появлению временное удлинение распадной части зависимости  $n = f(t)$  при использовании медных катодов с напыленным Ti может объясняться диффузионными процессами. Действительно, величина коэффициента диффузии поперек магнитного поля в сильно ионизированном газе определяется как:

$$D_{\perp} = \frac{T_i + zT_e}{m_i v_{in} \left[ 1 + \frac{\omega_e \omega_i}{(v_{en} + v_{in}) v_{in}} \right]}. \quad (3)$$

С ростом массы иона потери плазмы поперек магнитного поля будут уменьшаться, что улучшает условия удержания плазмы и, соответственно, его время.

На рис. 5 представлены зависимости плотности аргоновой плазмы от времени при различных давлениях рабочего газа. На рис. 6 и 7 приведены зависимости времени существования измеренной плотности плазмы в разряде и динамики плотности плазмы от давления нейтрального газа в различные моменты времени развития разряда. Время существования измеренной плотности плазмы изменяется в указанном диапазоне давлений примерно в 1,5 раза.

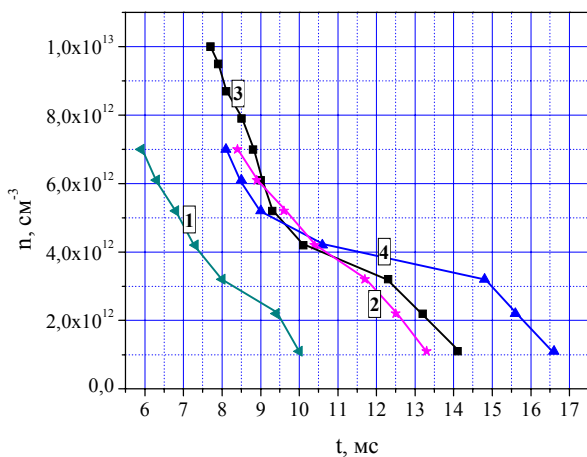


Рисунок 5 – Изменение плотности плазмы во времени для различных значений давления рабочего газа (аргона):  
 1 –  $P = 2,18 \cdot 10^{-3}$  тор; 2 –  $P = 3,9 \cdot 10^{-3}$  тор; 3 –  $P = 4,99 \cdot 10^{-3}$  тор; 4 –  $5,93 \cdot 10^{-3}$  тор

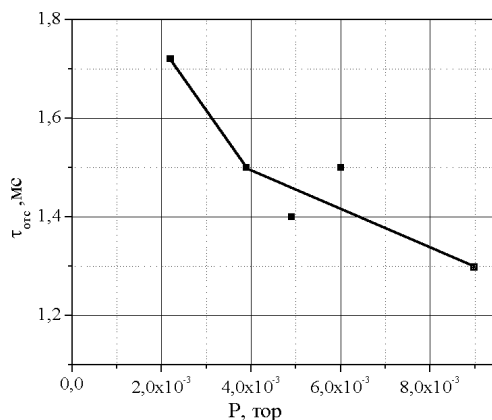


Рисунок 6 – Зависимость времени существования плазмы плотностью  $n \geq 1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  от давления рабочего газа (аргона)

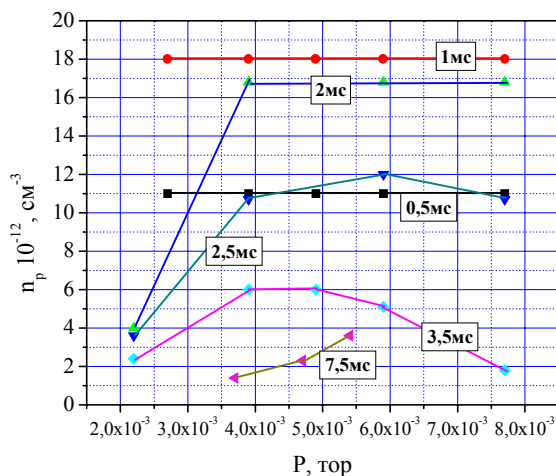


Рисунок 7 – Зависимость плотности плазмы от давления рабочего газа (аргона) для различных моментов разряда

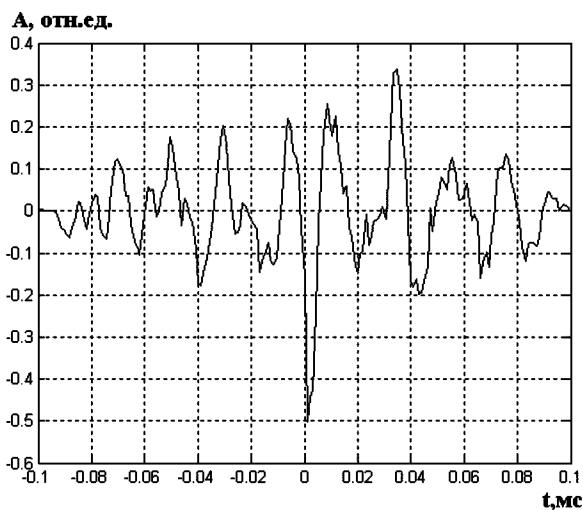


Рисунок 8 – Взаимнокорреляционная функция двух СВЧ сигналов, отраженных от плазменного слоя с  $n = n_{кр}$

Результаты корреляционного анализа отраженных СВЧ сигналов в каналах 5 и 6 (рис. 3) представлены на рис. 8 взаимнокорреляционной функцией (ВКФ) двух СВЧ-сигналов, отраженных от различных участков слоя плазмы одной плотности  $n = n_{кр}$  для зондирующей волны. Максимальная плотность плазмы на этой стадии разряда  $n > n_{кр}$ . С помощью корреляцион-

ных функций согласно [8] может быть определена скорость вращения плазмы. Действительно, сдвиг максимума ВКФ определяется временем прохождения элементов отражающего слоя с плотностью  $n = n_{кр}$  между антеннами 5 и 6 (рис. 3). Используя набор аналогичных ВКФ и значение радиуса отражающего слоя определена скорость вращения плазмы в скрещенных Е и Н полях ( $v_{вр} \sim 0,97 - 2,1 \cdot 10^6$  см/с) и круговая частота вращения ( $\omega_{вр} \sim 1,94 - 4,2 \cdot 10^5$  Гц).

Таким образом, в результате проведенных экспериментов определены условия создания водородной, аргонной, водородно-металлической и аргонно-металлической плазмы с максимальной плотностью  $1,8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и возможностью регулировки величины плотности в диапазоне  $10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup> за счет изменения давления нейтральной среды. Определены также параметры вращения образованного плазменного образования – скорость и частота вращения. Установлено наличие осевой симметрии плазменного образования в разряде.

**Список литературы:** 1. Изотопы: свойства, получение, применение. Т. 1 / Под ред. В.Ю.Баранова. – Москва: "ФИЗМАТЛИТ", 2005. – 600 с. 2. A.Litvak, S.Agnev, F. Anderegg *et al.* // 30<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA. – Vol. 27A, O-1.6A. 3. А.И.Карчевский, В.С.Лазько, Ю.А.Муромкин и др. // Физика плазмы. – Т.19, в.3. – 1993. – С. 411. 4. А.М.Егоров, В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с колебаниями на циклотронных частотах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3). – № 4. – 2004. – С. 323-325. 5. А.М.Рожков, К.Н.Степанов и др. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме // Письма в ЖЭТФ. – Т. 10, № 2. – 1969. – С. 71-75. 6. С.И.Скибенко, Ю.В.Ковтун, В.Б.Юферов Патент UA №24729 от 10.07.2007, Бюл. № 10, 2007 г. 7. Ю.В.Ковтун, Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов Коаксиальный ускоритель для заполнения магнито-плазменных сепараторов плазмой // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – № 20. – С. 107-113. 8. А.И.Скибенко, В.Л.Очеретенко *та ін.* // Укр.фіз.ж. – 2001. – Т. 46, № 4. – С. 443-448. 9. Г.И.Будкер. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую. (Физические принципы и предварительные расчеты). В книге Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерных реакций. Т.3. – Изд-во АН СССР, 1958. – 364 с.

Поступила в редколлегию 07.11.2007